

Avaliação experimental do comportamento sísmico de casas de madeiras

Paulo B. Lourenço, Jorge M. Branco, Nuno Mendes

ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães
pbl@civil.uminho.pt, jbranco@civil.uminho.pt, nunomendes@civil.uminho.pt

Alfredo Campos Costa, Paulo Candeias

Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas, Departamento de Estruturas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa
alf@lnec.pt, pcandeias@lnec.pt

SUMÁRIO

As casas de madeira estão a ter um desenvolvimento rápido na Europa devido a aspetos tais como a sustentabilidade e o elevado grau de industrialização e prefabricação, que se traduzem em facilidade e rapidez de montagem. Os sistemas mais tradicionais de estruturas de madeira e os sistemas inovadores recentes são agora aplicados não apenas no norte da Europa mas, crescentemente, no sul da Europa, onde a perigosidade sísmica é mais elevada. Neste artigo revêem-se brevemente o desempenho de edifícios de madeira em sismos recentes, definem-se os aspetos que caracterizam a ação sísmica na regulamentação europeia e apresentam-se os resultados de uma campanha extensa de ensaios realizados na mesa sísmica no Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

PALAVRAS-CHAVE: ESTRUTURAS, MADEIRA, SISMOS, DANOS, ENSAIOS

1. INTRODUÇÃO

Um desastre é um evento provocado pela natureza ou pelo homem que causa grande dano físico, destruição ou perda de vidas humanas, ou uma alteração drástica no ambiente natural. A perigosidade representa o nível de ameaça à vida, propriedade ou ambiente. É importante compreender que a perigosidade não é relacionável com os danos, e que os desastres são a consequência de uma gestão do risco deficiente.

A gestão do risco implica, primeiro, a perceção e a comunicação do risco à sociedade. É depois essencial dispor de ferramentas adequadas de avaliação e diagnóstico, mas também de um conjunto de soluções possíveis, incluindo custos, para implementar uma estratégia de redução do risco. Nos últimos 30 anos, as perdas económicas com os desastres aumentaram dez vezes, enquanto os sismos provocaram 80000 mortos/ano na última década, ver Figura 1. De acordo com [1], os sismos causaram cerca de seis milhões de mortes em 500 anos (1500-2000). Na última década ocorreram vários sismos que individualmente causaram um número impressionante de mortes, como por exemplo o sismo no Haiti em 2010 (316 mil mortos) e o sismo na Indonésia em 2004 (228 mil mortos). Em Portugal, estima-se que o sismo de 1755 e o subsequente *tsunami* destruíram

cerca de 85% dos edifícios e causaram a morte de 25% da população de Lisboa (70000 mortos) [2]. No entanto, os sismos só por si dificilmente são responsáveis pela morte de pessoas, sendo o colapso dos edifícios a principal causa das mortes. Assim, as atenções devem ser conduzidas para o desempenho sísmico dos edifícios.

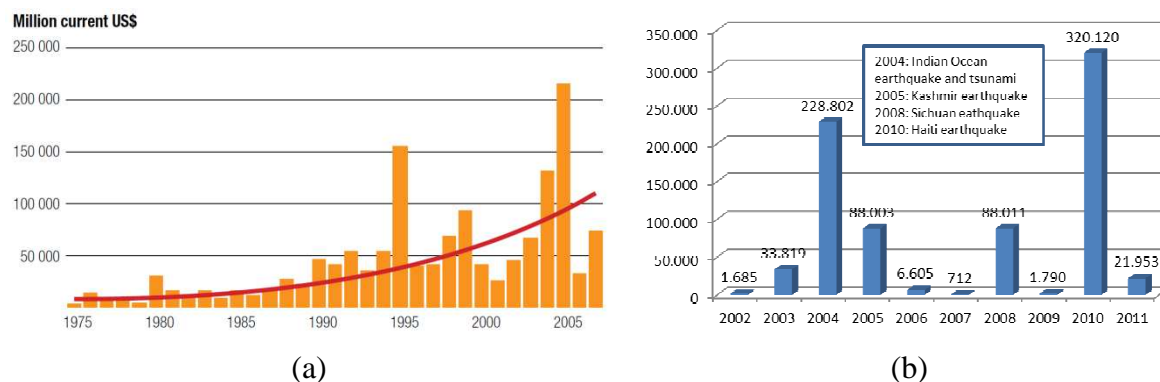


Figura 1 – Efeitos dos desastres: (a) Perdas económicas associadas a desastres naturais [2]; (b) Número de mortos em consequência de sismos nos últimos dez anos [3].

A experiência de projetar estruturas de madeira para os sismos, nomeadamente em altura, é moderada. Existe a convicção que a madeira, sendo um material leve e com resistência relativamente elevada, possuirá um bom desempenho em relação às ações sísmicas. Um exemplo recente pode ser encontrado em [4] para os sismos da Cantuária na Nova Zelândia em 2010-11. A avaliação do desempenho de 112 igrejas afetadas e construídas essencialmente nos últimos 150 anos, ver Figura 2, indica claramente a maior vulnerabilidade das construções em alvenaria (cerca de 85% danificadas), quando comparadas com as construções em madeira (cerca de 5% danificadas).

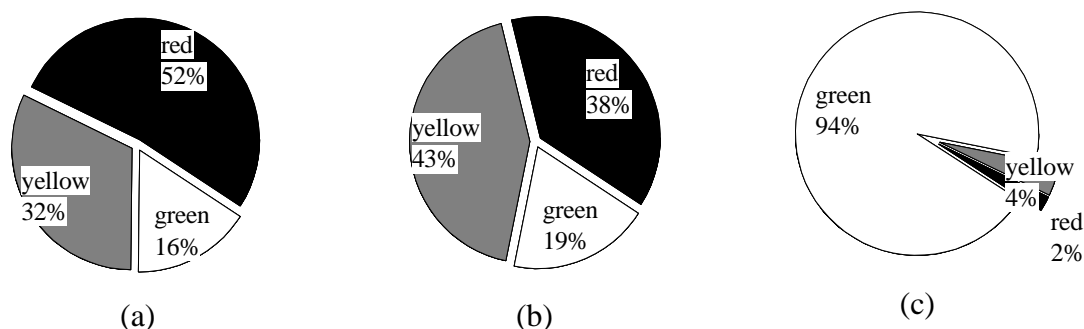


Figura 2 – Indicações dos placards colocados na Nova Zelândia para a série de sismos 2010-2011 (vermelho: edifício inseguro com acesso proibido; amarelo: segurança comprometida com acesso urgente permitido; verde: sem restrições): (a) Igrejas de pedra; (b) Igrejas de alvenaria de tijolo; (c) Igrejas de madeira [4].

É certo, no entanto, que não se pode afirmar que as estruturas de madeira são à prova de sismos. Seja porque os projetos são deficientes, seja porque o nível de conhecimento é insuficiente, seja porque a manutenção e conservação dos edifícios existentes é inadequada, seja porque a ação sísmica é superior ao expectável, ou seja pela combinação destes efeitos, têm-se observado danos importantes em estruturas de madeira, como se verá a seguir.

Por outro lado verifica-se uma vontade de construir cada vez mais alto utilizando estruturas de madeira. O edifício mais conhecido é provavelmente o *Stadthaus* na parte este de

Londres, realizado com paredes e lajes em madeira maciça com painéis bidirecionais de madeira lamelada colada cruzada, com arquitetura de Waugh Thistleton e engenharia de Techniker Ltd [5], ver Figura 3. Trata-se de um edifício de rés-do-chão mais oito pisos, construído em menos de seis meses (a estrutura em apenas um mês), em 2008, existindo já estudos para construções em grande altura. Refere-se ainda um edifício de seis pisos construído na zona com maior perigosidade sísmica da Nova Zelândia (Wellington), em 2004, recorrendo a vigas em I e contraplacado para as lajes, bem como paredes de contraventamento em contraplacado, ver Figura 4.

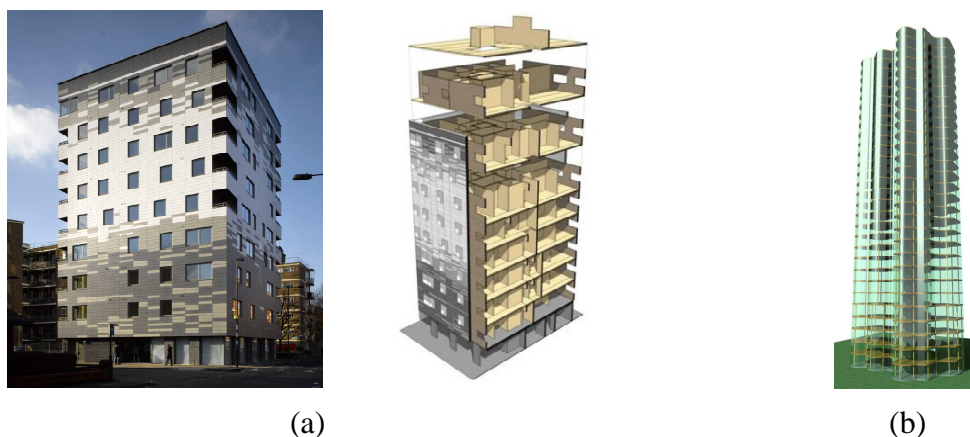


Figura 3 – Edifícios de madeira em altura: (a) *Stadthaus* em Londres, oito pisos, 2008; (b) Estudo para edifício de 25 pisos [5].



Figura 4 – Residência de estudantes na Nova Zelândia, 2004: (a) Imagem exterior; (b) Detalhe da estrutura [6].

Face aos desenvolvimentos recentes e à reduzida experiência normativa, justifica-se claramente um maior conhecimento sobre o comportamento sísmico das casas de madeira. Neste artigo, revê-se brevemente os danos verificados em estruturas de madeira em sismos reais, discute-se a ação sísmica e a normativa europeia, e descrevem-se ensaios realizados recentemente na mesa sísmica triaxial do Laboratório Nacional de Engenharia Civil tendo em vista validar quatro soluções diferentes comercializadas na Europa.

2. DESEMPENHO DOS EDIFÍCIOS DE MADEIRA NOS SISMOS DO JAPÃO

No sismo de Tohoku (Japão) em 2012 foram observados danos muito distintos devido às amplificações locais, incluindo [7]: (a) o colapso ou dano severo devido a deslizamentos dos solos ou rotura de paredes de contenção; (b) a rotação ou afundamento dos edifícios como resultado da liquefação dos solos; (c) o varrimento de casas pelo *tsunami* que se seguiu ao sismo; (d) alguns danos importantes em paredes ou pórticos, apesar de projetos presumivelmente adequados. Os danos (a-c) não estão diretamente ligados às estruturas de madeira, ainda que, dependendo das condicionantes locais, tenham de ser prevenidos e que o desempenho das estruturas de madeira possa ser significativamente pior nestes casos quando comparados com estruturas mais pesadas ou com maior redundância. Em geral, as maiores causas de dano em edifícios de habitações e lojas foram devidas à falta de elementos resistentes aos sismos, sendo que a deterioração natural e o problema das térmitas também assumiram um papel relevante, como ilustrado na Figura 5a, onde se ilustra o colapso integral de uma casa em madeira. A Figura 5b ilustra danos em construções patrimoniais em madeira, tendo sido reportados muitos danos em templos. Foram ainda observados casos de casas modernas, sem deterioração, que sofreram danos severos mas as modernas construções em madeira, projetadas de acordo com a regulamentação em vigor no Japão, tiveram bom desempenho.

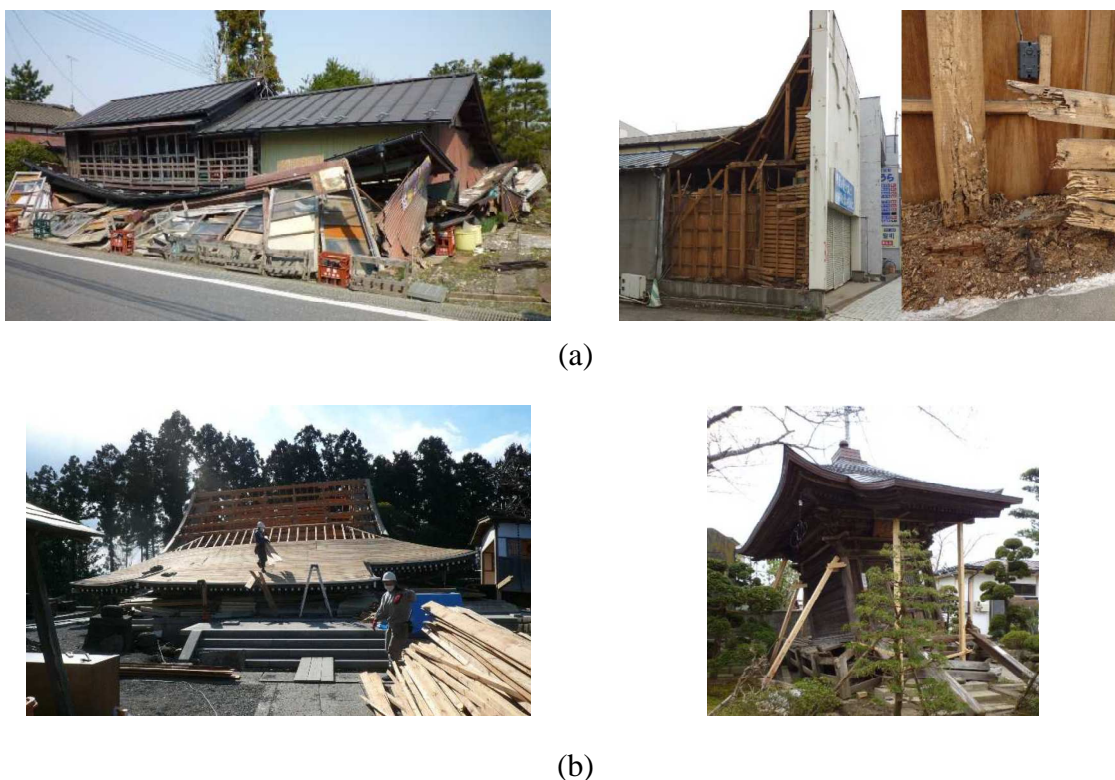


Figura 5 – Danos em estruturas de madeira no sismo de Tohoku, Japão (2011): (a) Casas de madeira; (b) Templos [7].

Neste contexto referem-se ainda os elevados danos que as estruturas tradicionais japonesas de madeira sofreram no sismo de Kobe em 1995 [8], ver Figura 6. As estruturas de madeira japonesas tradicionais foram desenvolvidas a partir de tradições antigas. No século XIX, Figura 7a, era notória a falta de elementos de travamento ou paredes resistentes ao corte, capazes de resistir a ações horizontais. Como consequência surgiram danos muito severos

no caso de sismos ou tufões. A partir de 1950, os elementos capazes de resistir a ações horizontais passaram a ser obrigatórios e métodos modernos de projeto e construção foram desenvolvidos. A Figura 7b mostra uma estrutura de madeira inspirada na construção tradicional. Mas a Figura 6 mostra que o desempenho no sismo de Kobe foi inadequado, essencialmente devido a problemas de torção (ignorados até esta data no Japão para edifícios com poucos pisos, onde apenas se considerava um mínimo de área de paredes resistentes ao corte em planta) e um piso excessivamente deformável (usualmente designado por *soft storey*).



Figura 6 – Danos em casas de madeira no sismo de Kobe, Japão (1995) [8].

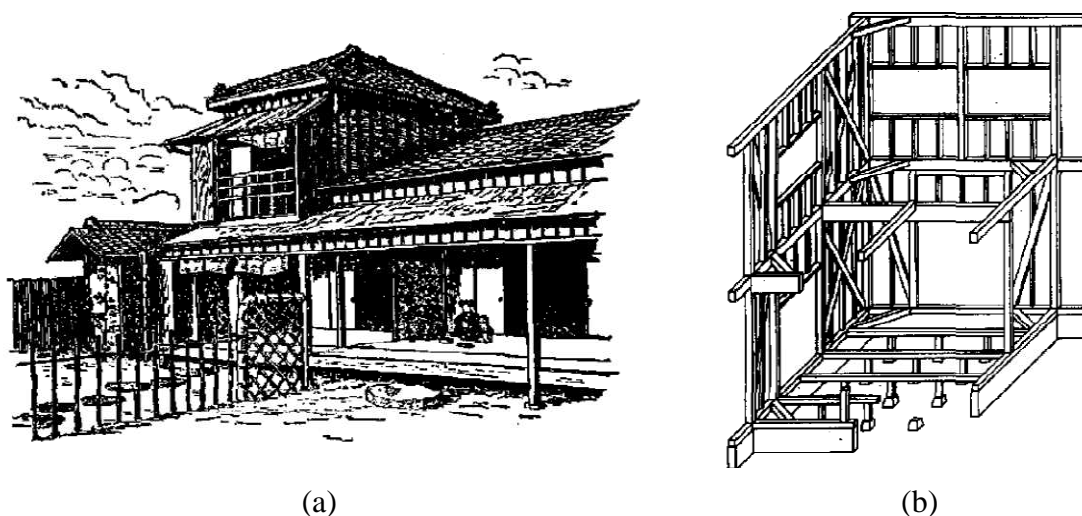


Figura 7 – Casas tradicionais japonesas: (a) Perspetiva; (b) Esquema estrutural [9].

3. CARACTERIZAÇÃO DA AÇÃO SÍSMICA

A caracterização da ação sísmica corresponde a um dos primeiros passos no dimensionamento sísmico de edifícios. As normas para dimensionamento e verificação da estabilidade de estruturas definem, em geral, a ação sísmica através de dois tipos de representações: (a) acelerogramas; (b) espectros de resposta. Os acelerogramas (Figura 8a) correspondem a séries de acelerações e são a representação mais direta da ação sísmica. Os acelerogramas podem ser gerados artificialmente, de acordo com as características definidas nas normas, podem ser simulados através de modelos numéricos ou podem corresponder a registos reais de sismos ocorridos no passado. Os espectros de resposta (Figura 8b) são uma representação gráfica da resposta máxima, por exemplo em aceleração, de um oscilador de um grau de liberdade, que tem em consideração as características da ação sísmica específicas ao caso em análise.

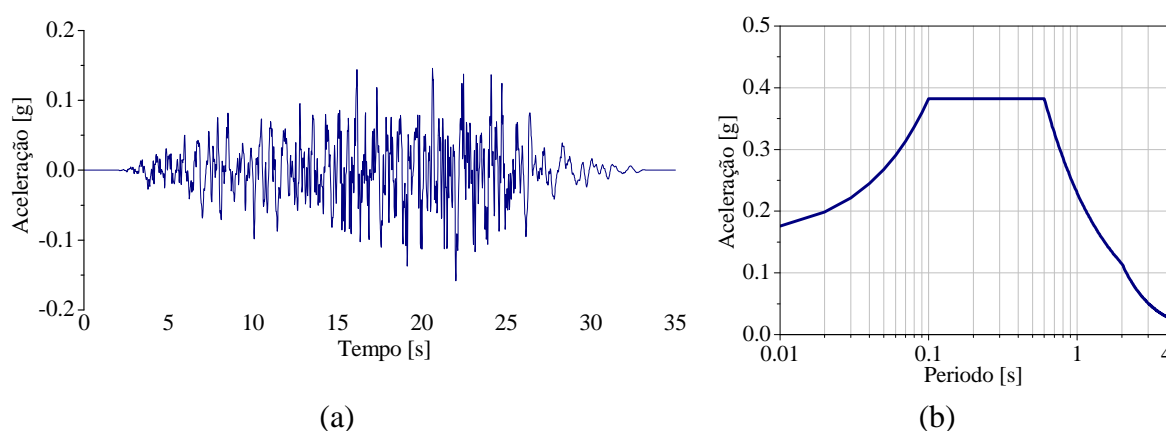


Figura 8 – Representação da ação sísmica; (a) Acelerograma; (b) Espectro de resposta.

O Eurocódigo 8 (EC8) é uma norma europeia, com aplicação em Portugal, para o projeto de estruturas para resistência aos sismos, constituída por seis partes, que tem como objetivos proteger a vida humana, limitar as perdas económicas e assegurar a operacionalidade de estruturas importantes para a proteção civil. De acordo com a Parte 1 do EC8 [10], as estruturas localizadas em regiões com perigosidade sísmica devem ser dimensionadas e construídas de forma a cumprir dois requisitos fundamentais: (a) requisito de não ocorrência de colapso; (b) requisito de limitação de danos. No requisito de não ocorrência de colapso, as estruturas sujeitas à ação sísmica de cálculo não devem colapsar, preservando a sua integridade estrutural e capacidade resistente residual após o sismo. No requisito de limitação de danos, as estruturas sujeitas a uma ação sísmica com probabilidade de ocorrência maior do que a da ação sísmica de cálculo devem apresentar danos limitados, ou seja, devem ser projetadas de forma a evitar danos estruturais e limitar os danos não estruturais. Assim, os requisitos regulamentares estão associados a intensidades sísmicas e períodos de retorno diferentes. O requisito de não ocorrência de colapso e o requisito de limitação de danos são verificados, em edifícios correntes, para uma ação sísmica com período de retorno de 475 anos e 95 anos, respetivamente.

Os requisitos regulamentares estão associados a dois tipos de estados limites: (a) estados limites últimos; (b) estados limites de utilização. Os estados limites últimos estão associados ao colapso global ou outros tipos de rotura estrutural que possam colocar em risco a segurança das pessoas (requisito de não ocorrência de colapso). Nestes estados limites deve-se verificar que a estrutura tem resistência e capacidade de dissipação de energia necessárias para se manter estável sob a ação sísmica de cálculo. Os estados limites

de utilização têm por objetivo limitar os danos (requisito de limitação de danos) através do controlo da deformação e outros limites aplicáveis, como por exemplo o controlo do deslocamento máximo de uma laje para controlo de danos em paredes divisórias.

A sismicidade é definida no EC8 através do valor de referência da aceleração máxima na base da estrutura num terreno rochoso (a_{gR}). Os territórios nacionais são divididos em zonas sísmicas, admitindo-se que a sismicidade é constante em cada zona sísmica. Além disso, o EC8 considera dois tipos de sismos: (a) Tipo 1, que corresponde ao sismo afastado com magnitude das ondas de superfície moderada ou elevada ($M_s > 5,5$); (b) Tipo 2, que corresponde ao sismo próximo e com magnitude das ondas de superfície baixa ($M_s < 5,5$). Na Figura 9 apresentam-se os valores de a_{gR} , definidos no Anexo Nacional (AN) para Portugal Continental e para os dois tipos de ação sísmica.

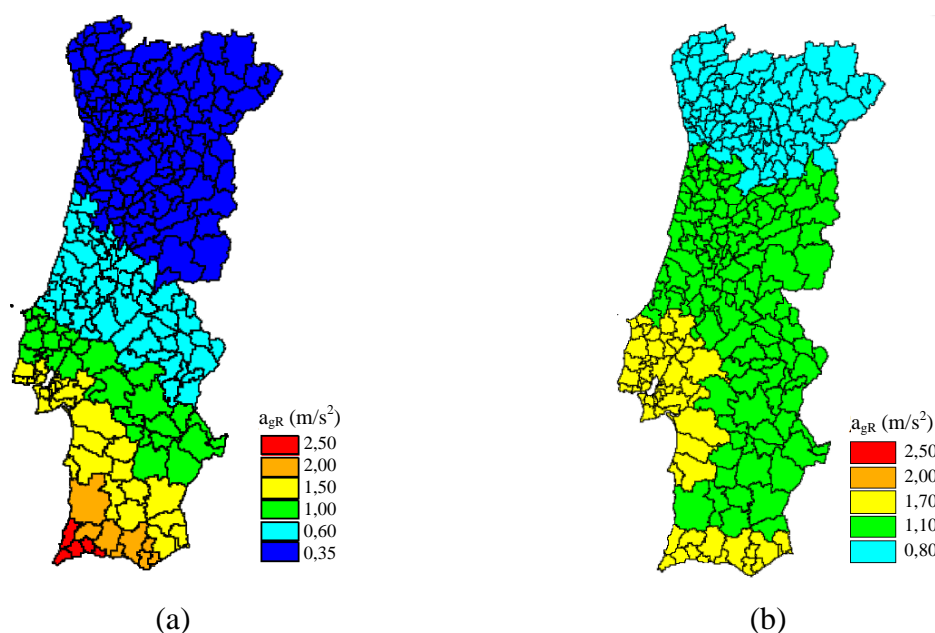


Figura 9 – Zonamento sísmico em Portugal Continental: (a) Ação sísmica Tipo 1; (b) Ação sísmica Tipo 2 [10].

O valor de referência da ação sísmica está associado ao período de retorno de referência do requisito de não ocorrência de colapso e a edifícios correntes. No entanto, os edifícios não apresentam o mesmo nível de importância no que se refere às consequências associadas ao seu colapso em termos de perdas de vidas humanas, segurança pública e proteção civil após sismo, bem como às consequências socioeconómicas. Assim, o EC8 agrupa os edifícios em quatro classes de importância associadas a diferentes períodos de retorno da ação sísmica. O valor de cálculo da ação sísmica para o requisito de não ocorrência de colapso (estados limites últimos) é obtido através da multiplicação do valor de referência da ação (a_{gR}) pelo coeficiente de importância do edifício (γ_I). De acordo com o AN, o valor do coeficiente de importância para edifícios correntes é igual a 1,0. Como exemplo, a ação sísmica de cálculo do tipo 1 é reduzida 35% para edifícios de menor importância para a segurança pública, e agravada 95% para edifícios de importância vital para a proteção civil, em relação à ação sísmica de referência (Tabela 1).

O tipo de solo de fundação é uma característica que também tem influência sobre a ação sísmica ao nível da base das estruturas. Em geral, os danos produzidos por um sismo numa determinada zona sísmica apresentam uma distribuição relativamente heterogénea, em função da geologia do local (efeito de sítio). O tipo de solo provoca alterações no conteúdo

de frequências, na amplitude e duração do sismo à superfície. O EC8 considera a influência do tipo do solo de fundação na ação sísmica através do coeficiente de solo S , cujo valor é definido no AN, em função da classificação do solo. São definidos cinco tipos de solo de fundação (A a E), descritos por perfis estratigráficos, e que variam entre solos do tipo rochoso (A) e solos brandos situado sobre estratos mais rígidos (E). São apresentados ainda dois tipos de solos especiais (S_1 e S_2), para os quais é necessário realizar estudos específicos para a definição da ação sísmica.

O AN apresenta os valores do coeficiente de solo (S) a considerar na definição da ação sísmica de cálculo para o requisito de não ocorrência de dano em função do valor da aceleração à superfície de um solo de fundação do tipo A (a_g) e do parâmetro S_{max} . O valor do parâmetro S_{max} é definido em função do tipo de solo e de ação sísmica. Em geral, o valor do coeficiente S assume o valor 1,0 para solos rochosos (A) e é agravado para solos brandos.

Tabela 1 – Classes e coeficientes de importância para Portugal Continental [10].

Classe de importância	Edifícios	Coeficiente de importância	
		Ação sísmica do Tipo 1	Ação sísmica do Tipo 2
I	Edifícios de importância menor para a segurança pública, como por exemplo edifícios agrícolas, etc.	0,65	0,75
II	Edifícios correntes, não pertencentes às outras categorias.	1,00	1,00
III	Edifícios cuja resistência sísmica é importante tendo em vista as consequências associadas ao colapso, como por exemplo escolas, salas de reunião, instituições culturais, etc.	1,45	1,25
IV	Edifícios cuja integridade em caso de sismo é de importância vital para a proteção civil, como por exemplo hospitais, quartéis de bombeiros, centrais elétricas, etc.	1,95	1,50

A ação sísmica de cálculo para o requisito de limitação de danos (estados limites de utilização) é obtida multiplicando a ação sísmica de cálculo para requisito de não ocorrência de colapso (estados limites últimos) por um fator de redução (ν). O EC8 apresenta dois valores distintos para o fator de redução, em função dos dois tipos de ação sísmica. De acordo com o AN, o fator de redução assume o valor de 0,40 e 0,55 para a ação sísmica do Tipo 1 e Tipo 2, respetivamente.

No EC8 a ação sísmica é representada igualmente por acelerogramas e espectros de resposta elásticos. Os acelerogramas artificiais devem ser compatíveis com os espectros de resposta definidos para um amortecimento viscoso igual a 5%. Os acelerogramas são preferencialmente utilizados na análise não-linear dinâmica, na qual deverão ser utilizados, no mínimo, três acelerogramas. Além dos acelerogramas artificiais, o EC8 contempla também a utilização de acelerogramas artificiais e registados. Os espectros de resposta elásticos horizontais de cálculo são definidos para os dois tipos de ação sísmica e são

função do coeficiente de amortecimento, do coeficiente de comportamento (q), do coeficiente correspondente ao limite inferior do espectro de cálculo horizontal (β) e dos períodos que delimitam os domínios da resposta com aceleração, velocidade e deslocamento constante (T_B , T_C e T_D). O valor de q é função do tipo de material e β assume, em geral, o valor de 0,2. Os valores de T_B , T_C e T_D são definidos no AN e são função do tipo de ação sísmica e tipo de solo de fundação. O EC8 apresenta também os critérios para definição do espectro de resposta vertical. Os espectros de resposta são utilizados correntemente na análise modal.

Além das regras gerais para edifícios, o EC8 define regras específicas de acordo com o tipo de material da estrutura. No que se refere às estruturas em madeira, são apresentadas regras adicionais às regras do Eurocódigo 5 (EC5) [11] para resistência ao sismo. De acordo com o EC8, os edifícios de madeira resistentes aos sismos devem apresentar um dos seguintes comportamentos: (a) comportamento estrutural dissipativo; (b) comportamento estrutural de baixa dissipação. No primeiro comportamento considera-se a capacidade de partes da estrutura em regime não elástico (zonas dissipativas) e o coeficiente de comportamento poderá assumir um valor superior a 1,5. Uma estrutura dimensionada de acordo com o comportamento estrutural dissipativo deve pertencer às classes de ductilidade DCM (média) ou DCH (alta). As zonas dissipativas devem estar localizadas nas ligações e os elementos de madeira devem ser considerados com comportamento elástico.

No comportamento estrutural de baixa dissipação, os esforços são determinados com base numa análise global elástica, não considerando o comportamento não linear dos materiais e um coeficiente de comportamento não superior a 1,5. A resistência dos elementos de madeira e das ligações são determinadas exclusivamente com base nos critérios definidos no EC5. As estruturas dimensionadas de acordo com este tipo de comportamento pertencem à classe de ductilidade DCL (baixa). No entanto, este critério de dimensionamento é apenas apropriado para certos tipos de estruturas (Tabela 2). O EC8 apresenta ainda um conjunto de regras que devem ser consideradas no dimensionamento de estruturas de madeira resistentes ao sismo, nomeadamente relacionadas com as zonas dissipativas, as classes de ductilidade e coeficiente de comportamento, a análise estrutural, os processos construtivos, a verificação da segurança e o controlo do projeto e construção.

4. ENSAIOS RECENTES NA MESA SÍSMICA TRIAXIAL DO LNEC

No âmbito do Programa Capacidades do 7º Programa Quadro da Comissão Europeia, uma parceria de 23 atores relevantes na engenharia sísmica abriam as suas infraestruturas de investigação à comunidade técnica europeia para acesso livre e transnacional. Os equipamentos disponibilizados incluem as quatro maiores mesas sísmicas na União Europeia, a maior parede de reação e instalação para ensaios pseudo-dinâmicos da União Europeia, e duas centrifugadoras conceituadas. Cerca de 30 projetos foram contemplados, sendo que os ensaios encontram-se atualmente todos concluídos ou em fase de conclusão.

O objetivo do projeto casas de madeira é avaliar o seu desempenho sísmico, considerando três soluções distintas: i) sistema porticado com contraplacado, PFS ou *platform frame system*; ii) sistema de troncos de madeira maciça, LHS ou *log house system*; e iii) sistema de painéis maciços de madeira, CLT ou *cross laminated timber system*. O projeto envolve diretamente a indústria produtora destes sistemas (Rusticasa Construções em Portugal, a Rubner Haus e a Legnocese em Itália e a Kaufmann na Áustria), empresas especialistas na construção em madeira (Vinzenz Harrer da Áustria e Rothoblaas de Itália) e três universidades europeias (Universidade de Trento, Itália, Universidade Técnica de Graz, Áustria e Universidade do Minho, Portugal).

Tabela 2 – Tipos estruturais e valores limites superiores dos coeficientes de comportamento para edifícios de madeira [10].

Classe de ductilidade	q	Exemplo de estruturas
Baixa capacidade de dissipação de energia - DCL	1,5	Consolas; vigas; arcos com duas ou três ligações rotuladas; asnas com ligações por ligadores em anel, em placa circular ou em placa denteada.
Média capacidade de dissipação de energia - DCM	2,0	Painéis de parede colados com diafragmas colados, ligados por pregos e parafusos de porca; asnas com ligações com parafusos de porca e com cavilhas; estruturas mistas constituídas por uma estrutura de madeira (resistente às forças horizontais) e por um enchimento não resistente.
	2,5	Pórticos hiperestáticos com ligações com parafusos de porca e com cavilhas.
Alta capacidade de dissipação de energia - DCH	3,0	Painéis de parede pregados com diafragmas colados, ligados por pregos e parafusos de porca; asnas com ligações pregadas.
	4,0	Pórticos hiperestáticos com ligações com parafusos de porca e com cavilhas.
	5,0	Painéis de parede com diafragmas pregados, ligados por pregos e parafusos de porca.

As casas de madeira estão a ter um desenvolvimento rápido na Europa devido a aspetos tais como a sustentabilidade e o elevado grau de industrialização e prefabricação, que se traduzem em facilidade e rapidez de montagem. Os sistemas mais tradicionais de estruturas de madeira e os sistemas inovadores recentes são agora aplicados não apenas no norte da Europa mas, crescentemente, no sul da Europa, onde a perigosidade sísmica é mais elevada. O comportamento elástico-frágil dos elementos de madeira, usualmente associados às ligações, pode limitar a aplicação das construções em madeira, utilizadas no passado essencialmente para coberturas e pavimentos. A suspeição da comunidade técnica e científica relativamente à resistência sísmica das estruturas de madeira está ilustrada na normativa atual, uma vez que apenas se reconhece as capacidades dissipativas das ligações entre os elementos, com restrições severas em diversas ligações.

Apenas recentemente se abandonou a utilização de estruturas de madeira estaticamente determinadas, ou com redundância reduzida, por sistemas modernos capazes de competir com estruturas de betão armado ou metálicas para construção em altura. Importa desta forma definir regras de projeto sísmico adequadas a estas soluções. O objetivo da presente campanha de ensaios é verificar, utilizando, ensaios à escala real, os efeitos de um sismo em diferentes casas de madeira projetadas e construídas de acordo com as regras atuais da engenharia das madeiras. Os resultados permitirão ainda validar os modelos de cálculo existentes, definir coeficientes de comportamento adequados e definir regras construtivas adequadas no que respeita a ligadores, prumos, elementos de contraventamento, aberturas, deslocamento entre pisos, entre outros aspetos relevantes para o desempenho sísmico.

A campanha de ensaios foi realizada na mesa sísmica triaxial do LNEC, ver Figura 10, durante os anos de 2012 e 2013, incluindo o ensaio de quatro edifícios de 2 e 3 pisos à

escala real. Esta mesa sísmica triaxial permite a introdução de três sinais, sendo dois horizontais em direções transversais e um vertical. A mesa possui dimensões de 4.6 (transversal) \times 5.6 (longitudinal) m^2 , com um sistema de atuadores e de controlo que permitem o movimento desejado [12]. A mesa foi construída em 1995, tendo posteriormente sido submetida a melhoramentos em 2003 (para aumento da velocidade) e 2011 (no sistema de controlo e de vídeo). Neste caso, foi ainda construída uma base metálica que permite o ensaio de edifícios com uma área maior que a da mesa.

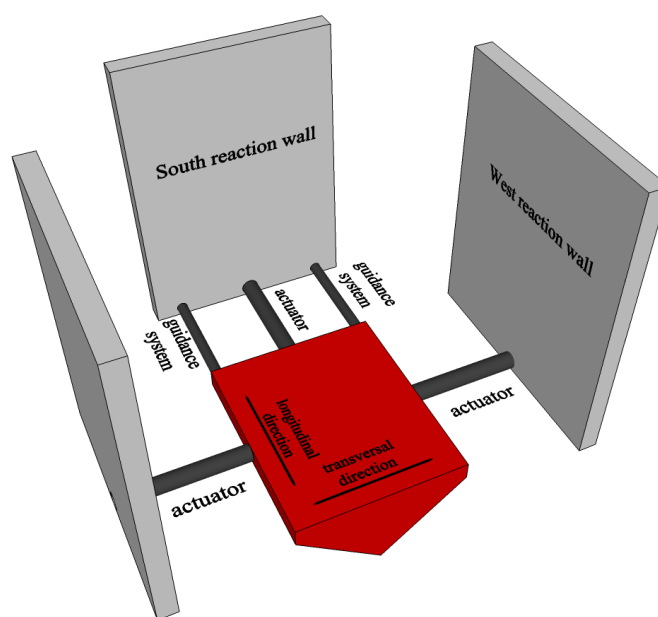


Figura 10 – Representação esquemática da mesa sísmica do LNEC.

4.1. Casa de troncos de madeira maciça

A casa possui uma planta simétrica na direção longitudinal com $5,6 \times 7,3 \text{ m}^2$, e com uma altura de $4,4 \text{ m}$ nas paredes e $5,3 \text{ m}$ na cumeeira de um telhado de duas águas, ver Figura 11. Os troncos possuem encaixe e secções transversais de $80/160 \times 160 \text{ mm}^2$ nas paredes interiores e exteriores, respetivamente. Estes elementos são de madeira lamelada colada de pinho bravo (*Pinus sylvestris L.*) da classe C24 [13]. Cada lamela possui 40 mm de espessura. O pavimento é realizado com vigas de uma secção transversal de $90 \times 165 \text{ mm}^2$ e painéis de aglomerado OSB com 22 mm de espessura. A cobertura é realizada com varas de $70 \times 190 \text{ mm}^2$ com uma inclinação de 18° e aglomerado pregado.

As ligações mecânicas são aparafusadas, existindo ainda entalhes a meia-madeira nas paredes exteriores e cauda de andorinha nas ligações entre paredes exteriores e interiores. A estrutura é aparafusada à base por ligadores metálicos que impedem o deslizamento.

As casas de troncos não dissipam energia significativa mas considerou-se um coeficiente de comportamento de 2, tomando em consideração alguma ação dissipativa por atrito. Não foram incorporadas no edifício nenhuns componentes não-estruturais, nem acabamentos, pelo que foram colocadas massas adicionais nos pavimentos e cobertura. Todos os elementos de madeira foram prefabricados na fábrica em Vila Nova de Cerveira e transportados cerca de 400 km para Lisboa. A montagem da casa foi realizada diretamente na mesa sísmica e durou 4 dias, ver Figura 12.

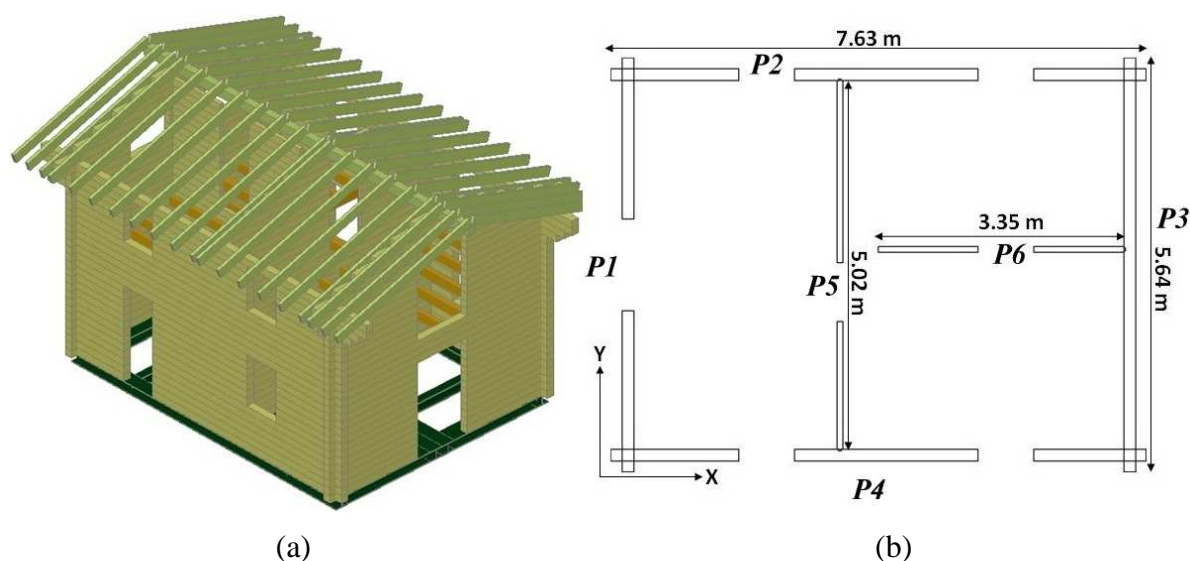


Figura 11 – Casa de troncos de madeira: (a) Perspetiva 3D; (b) Planta [13].



Figura 12 – Etapas de construção: Ligações dos troncos inferiores à base de fundação; Montagem das paredes do piso inferior; Colocação das vigas da laje do primeiro piso; Colocação do aglomerado do piso; Montagem das paredes do piso superior; Colocação da cumeeira; Colocação das varas da cobertura; Casa completa.

A aceleração sísmica introduzida correspondeu ao sismo de Montenegro de 1979 escalada para diferentes magnitudes que corresponderam a uma aceleração de pico (PGA ou *peak ground acceleration* de 0,07g, 0,28g e 0,5g). O edifício teve um desempenho sísmico muito satisfatório uma vez que para o primeiro nível não se verificou qualquer dano. Para o valor de PGA de 0,28g verificou-se algum deslizamento entre troncos a meia altura das paredes em dois locais. Para o nível máximo do ensaio verificaram-se alguns danos menores que incluíam fendas ao longo dos troncos devido à flexão fora do plano, fendas paralelas ao fio da madeira nas ligações entre paredes ortogonais devido a corte, deslizamento dos troncos devido a corte, danos na vizinhança dos parafusos, fendas internas na secção dos troncos e danos nos entalhes dos troncos, ver Figura 13. As medições efetuadas demonstram que o dano introduzido é muito pequeno, com uma alteração de frequência marginal na estrutura. Foram ainda obtidos resultados importantes para a limitação do dano, nomeadamente deslocamentos entre pisos e amplificação estrutural.



Figura 13 – Danos observados no ensaio.

4.2. Outros ensaios

A Figura 14 apresenta a planta e corte de uma das casas porticadas, bem como uma imagem da casa sobre a mesa sísmica e os parafusos adotados. A Figura 15 apresenta os componentes da casa em CLT, bem como uma imagem da casa sobre a mesa sísmica. Trata-se de casas com 3 pisos e 8 m de altura, com uma planta de $6 \times 7 \text{ m}^2$. O desempenho sísmico destas casas para o registo de sismos definido anteriormente foi excelente, sem qualquer dano estrutural. Na Figura 16 apresenta-se uma imagem geral da outra casa porticada (Legnocase) chamando à atenção para a única fissura detetada após terminada a longa campanha de ensaios sísmicos realizada.

A casa em CLT ficará instalada em Portugal para monitorização e utilização durante os próximos anos, permitindo avaliar o seu desempenho em serviço ao longo do tempo.

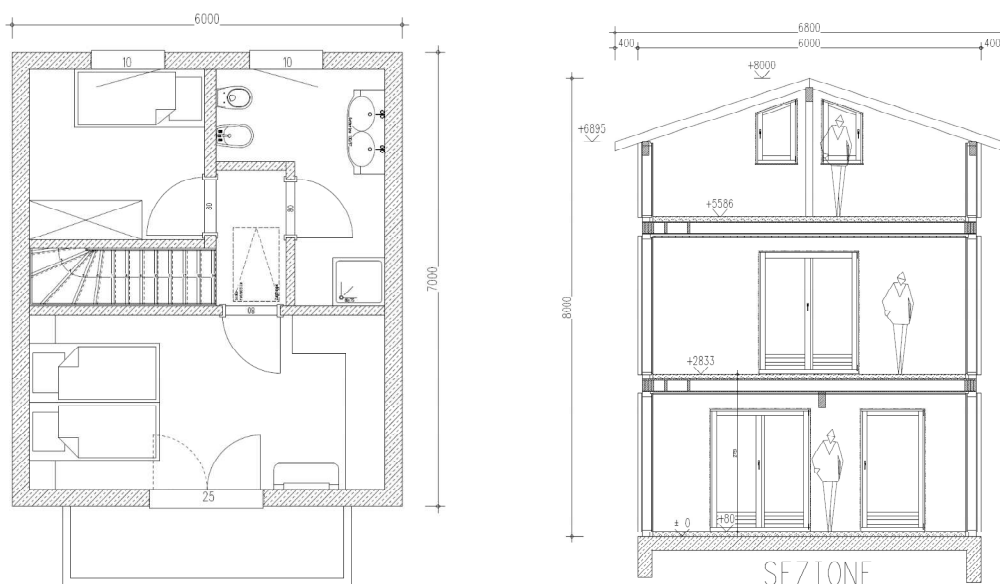
5. CONCLUSÕES

As casas de madeira estão a ter um desenvolvimento rápido na Europa em boa parte consequência de motivações ambientais e do elevado grau de industrialização e prefabricação que permitem, que se traduzem em facilidade e rapidez de montagem. Os sistemas tradicionais de estruturas de madeira e os vários sistemas inovadores desenvolvidos, ou em fase de desenvolvimento, são agora aplicados não apenas no norte da Europa mas, crescentemente, no sul da Europa, onde a perigosidade sísmica é mais elevada. O comportamento elástico-frágil dos elementos de madeira, em particular quando submetidos a esforços de tração ou flexão, pode limitar a aplicação das construções em madeira, utilizadas no passado essencialmente para coberturas e pavimentos.

A suspeição da comunidade técnica e científica relativamente à resistência sísmica das estruturas de madeira está ilustrada na normativa atual, uma vez que apenas se reconhece as capacidades dissipativas das ligações entre os elementos, com restrições severas em diversas ligações. Demonstrou-se com recurso a ensaios em mesa sísmica que as modernas construções em madeira possuem, no entanto, um excelente desempenho sísmico para ações sísmicas de magnitude considerável.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo projeto *Seismic performance of multi-storey timber buildings*. Seismic Engineering Research Infrastructures for European Synergies SERIES. 7º Programa-Quadro da Comissão Europeia.



(a)



(b)



(c)

Figura 14 – Rubner Haus: (a) Planta e corte; (b) Edifício sobre a mesa sísmica; (c) Parafusos e conectores.

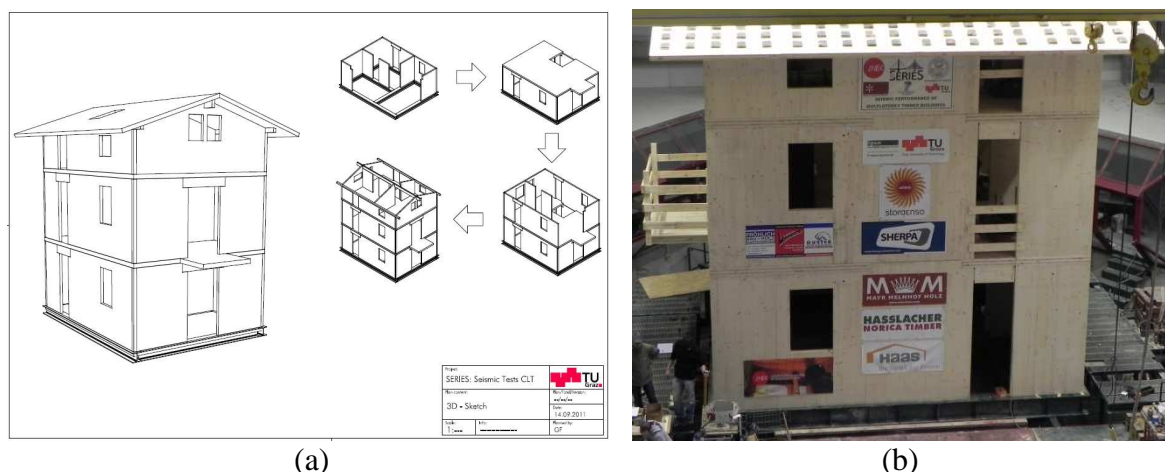


Figura 15 – Casa em CLT: (a) Perspetiva e componentes; (b) Edifício sobre a mesa sísmica.



Figura 16 – Legnocase: (a) Edifício sobre a mesa; (b) Fissura ao nível da laje do primeiro piso detetada no final da campanha de ensaios.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Hough S.E., Bilham R.G. *After the earth quakes – Elastic rebound on an urban planet*. Oxford University Press, Inc: New York, 2006.
- [2] Global assessment report on disaster risk reduction, United Nations International Strategy for Disaster Reduction Secretariat, ISBN 9789211320282, 2009.
- [3] U.S. Geological Survey: Science for a changing the world. Available from <http://www.usgs.gov>.
- [4] Leite, J., Lourenço, P.B., Ingham, J.M., Statistical Assessment of Damage to Churches Affected by the 2010-2011 Canterbury (New Zealand) Earthquake Sequence, *Journal of Earthquake Engineering*, 17(1), 73–97, 2013.
- [5] Techniker, Tall Timber Buildings, The Stadthaus, Hoxton, London, 2010.
- [6] Milburn, J., Banks, W., Six-level timber apartment building in a high seismic zone. *NZ Timber Design Journal*, 3(12), 9-13, 2004.

- [7] Kawai, N., Isoda, H., Tsuchimoto, T., Koshihara, M., Damage to wood buildings during the great Tohoku earthquake. Part2- Damage due to ground motion. *World Conference on Timber Engineering*, 16-19/07/2012, Auckland, Nova Zelândia, 2012.
- [8] Tomioka, Y., Kawaguchi, J., Morino, S., Fukao, H., Damages to timber houses caused by South-Hyogo earthquake and feasibility of structural design criteria. *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, paper no. 613, 23-28/06/1996, Acapulco, México, 1996.
- [9] Maki, N., Tanaka, S., Single-family wooden house. *World Housing Encyclopedia*. Available from <http://www.world-housing.net>.
- [10] NP EN 1998-1, Eurocódigo 8: Projeto de estruturas para resistência aos sismos – Parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios. *European Standard, CEN*, Instituto Português da Qualidade, Março 2010.
- [11] EN 1995-1-1, Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. *European Standard, CEN, Brussels*, November 2004.
- [12] Coelho, E., Carvalhal, F., Ensaios sísmicos, *Engenharia e Vida*, 10, 51-55, 2005.
- [13] Branco, J., Lourenço, P.B., Aranha, C., Seismic analysis of a 2-storey log house, SHATIS - 2nd International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures, 4-6/09/2013, Trento, Itália, 2013.